

EWD, Längs-Stabilität und all das Der stabile Geradeausflug

...ein nicht endendes Thema; immer wieder wird nach dem "richtigen" Schwerpunkt und nach der "richtigen" Einstellung von Tragfläche und Höhenleitwerk zueinander gefragt; ein Flugmodell, das in diesen Parametern grob falsch eingestellt ist, wird möglicherweise den allerersten Flug nicht überstehen. Die Unsicherheit bei Modellbau-Amateuren ist oft groß.

Die Sache ist wirklich nicht einfach. Selbst wenn man "nur" die einfachsten Berechnungen durchführt besteht durchaus Gefahr, sich in den vielen Details zu verlieren.

Die immer wieder unternommenen Versuche, das alles ohne Mathematik und Mechanik zu erklären, mögen dem einen oder anderen Modellflieger ein "Aha"-Erlebnis bescheren, aber ein offenes Problem bleibt: Mit Bildchen kann man keine EWD ausrechnen und dann ein neues Flugmodell sicher auf seine erste Reise schicken... Hier in dieser Übersicht schildere ich sehr kurz und anschaulich die wesentlichen Bedingungen für Gleichgewicht und statische Stabilität und gehe auf praktische Auswirkungen ein; diese Informationen sollten nützlich für's praktische Fliegen sein. Mechanische und mathematische Grundlagen werden in den Teilen 1 bis 4 mit einer gewissen Ausführlichkeit behandelt.

Ergebnisse ausrechnen ist eine Sache, zu wissen, was sie wert sind, eine andere. Ich lege daher auch Wert auf eine Diskussion der Fehler, die bei den relativ einfachen Rechnungen gemacht werden.

Einführung: Höhe halten, Gleichgewicht, Stabilität, Pendeln, Pumpen...

Thema dieses Aufsatzes ist das geradeaus fliegende Flugmodell. Das bedeutet, das Flugmodell fliegt keine Kurve und es hält Höhe und Geschwindigkeit. Um ersteres kümmern wir uns im Rahmen dieses Aufsatzes nicht: Ein symmetrisches, korrekt gebautes Flugzeug fliegt von selbst keine Kurve. Hingegen sind für stabiles Einhalten von Höhe und Geschwindigkeit einige Bedingungen zu erfüllen von denen die wichtigsten hier besprochen werden.
Das sieht im Überblick wie folgt aus:

- **Höhe halten:** Auftrieb muß gleich Gewicht sein (trivial, oder?)
- **Gleichgewicht:** Das Flugzeug darf nicht von alleine aus dem gewählten Flugzustand "kippen" (korrekt: "nicken") - Stichwort EWD.
- **Stabilität** (statisch): Wenn das Flugzeug durch einen äußeren Einfluß in der Bahn gestört wird muß es "das Bestreben haben", die Flugbahn wieder einzunehmen -Stichwort Schwerpunktwahl.
- **Pendeln** und **Pumpen:** Diese Flugeigenschaften (...Eigenarten) werden hier in der Theorie nur gestreift.

Höhe halten

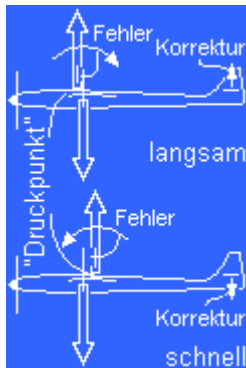


Die erste Bedingung wird meistens stillschweigend vorausgesetzt und soll hier ganz kurz angesprochen werden: Alle Auftriebskräfte (auch die negativen, nach unten gerichteten) sind in der Summe so groß wie die Gewichtskraft des Flugzeuges; dadurch ist sichergestellt, daß das Flugzeug nicht durchsackt (zu wenig Auftrieb) oder senkrecht zu seiner Flugbahn nach oben beschleunigt wird (zuviel Auftrieb). Hierbei gelten mit guter Näherung der reguläre Steigflug eines Motorflugzeuges ebenso wie die leicht nach unten geneigte Flugbahn eines Segler auch als "gestreckter Geradeausflug", denn hier wird lediglich zuviel oder zu wenig *Antrieb* durch Höhenänderungen ausgeglichen.

Genug Auftrieb kann für ein gegebenes Flugzeug - in Grenzen - durch verschiedene Maßnahmen erzeugt werden: den Anstellwinkel variieren oder die Fluggeschwindigkeit anpassen. Diese beiden Flugparameter gehören untrennbar zusammen. Beispiele: Der Pilot eines Segelflugzeuges möchte eine gewisse Fluggeschwindigkeit vorgeben und wählt dafür den passenden Anstellwinkel (z.B. "tiefer" trimmen); beim Motorflugzeug gibt man z.B. "mehr Gas", muß aber dann durch Höhenruder-Trimmung den zur Geschwindigkeit passenden Anstellwinkel einstellen, sonst steigt das Flugzeug bis es beim aufwärts fliegen den überschüssigen Antrieb verbraucht.

Gleichgewicht

Wenn einmal das Flugzeug so ausgerichtet wurde, daß es mit der gewünschten Geschwindigkeit fliegt, dann darf es nicht von alleine "wegnicken" (Auf-/ Ab-Drehungen um die Querachse werden als "Nicken" bezeichnet). Dieses "nicht schlecht Verhalten" des Flugzeuges wird **Gleichgewichtsbedingung** genannt. Um die Bedingung zu erfüllen muß das Höhenleitwerk alle Nickmomente am Flugzeug mit einem eigenen Nickmoment ausgleichen; zu diesem Zweck muß es mit einem anderen Anstellwinkel fliegen als der Tragflügel. Für einen bevorzugten Flugzustand kann man diesen Unterschied fest einbauen: die Einstellwinkeldifferenz (EWD). Interessant ist natürlich die Frage, wie groß die EWD für den gewünschten Flugzustand sein muß; wie schon beschrieben ist ein Flugzustand durch den Anstellwinkel und die dazu passende Fluggeschwindigkeit gekennzeichnet. Folgende Einflüsse bestimmen die EWD:



- Leider ist das Nickmoment am Tragflügel nicht konstant; vielmehr ändert es sich für jeden Flugzustand. Auch dem Amateur ist der Begriff "Druckpunktwanderung" bekannt: Mit zunehmender Geschwindigkeit sieht es so aus als würde die Auftriebskraft immer weiter hinten angreifen und das Flugzeug so zum Abwärtsnicken bringen. Kurzform: Bei hoher Geschwindigkeit steigt die Tendenz des Modelles zum Abwärts-Nicken.
- Andererseits liegt der Anstellwinkel auch am Höhenleitwerk an (vereinfacht), ein größerer Anstellwinkel erzeugt also mehr Auftrieb am Höhenleitwerk und läßt das Flugzeug abwärts nicken (gilt nicht für Canards). Kurzform: Bei hoher Geschwindigkeit (kleiner Anstellwinkel) steigt die Tendenz des Modelles zum Aufwärts-Nicken.

Diese beiden Einflüsse arbeiten also gegeneinander, der zweite überwiegt aber.

- Ferner bedeutet natürlich ein Vorverlegen des Schwerpunktes ein zusätzliches Abwärtsnicken des Flugzeuges, das ausgeglichen werden muß.

Detailliertere Angaben zur Berechnung der EWD finden Sie in [Teil 1](#) und [Teil 2](#).

Da die EWD nur für einen bevorzugten Flugzustand eingestellt werden kann muß sie für andere Flugzustände durch Trimmung des Höhenruders ergänzt werden (z.B. "tief trimmen" = "schneller trimmen").

Durch Baumaßnahmen und Trimmung muß sichergestellt werden, daß alle Drehmomente um die Querachse (Nickmomente, Nickachse) für den eingestellten Flugzustand in der Summe Null werden.

Bei der "Trimmung" gibt es einen wesentlichen Unterschied zwischen "echtem" Flugzeug und Flugmodell: Beim Flugzeug soll im getrimmten Zustand das Höhenruder möglichst keine Kraft vom Piloten erfordern, denn das wäre auf die Dauer ermüdend und gefährlich; bei einem Flugmodell dagegen bedeutet Trimmung lediglich eine halb feste Einstellung des Ruders in engen Grenzen - ob das Servo für diese Einstellung Kraft aufwenden muß ist dabei nicht so wichtig, die Belastung der Servos und Gestänge ist bei kleineren Modellen nicht kritisch.



Das Vorzeichen der EWD wird in der Literatur nicht einheitlich verwendet. In diesem Aufsatz ist die EWD wie folgt definiert: Einstellwinkel-Tragfläche minus Einstellwinkel-HLW; damit ist die EWD positiv, wenn die Tragfläche stärker angestellt ist als das HLW (siehe Bild links).

Als Faustregel für "übliche" Flugmodelle wurde die Näherungsformel genannt: (Profilwölbung (in %) minus 1) in ° ist die EWD. Beispiel: Das RG15 hat eine Wölbung von 1.76%, die EWD sollte also ein knappes ° betragen. Da die Benützung des im [dritten Teil](#) beschriebenen EXCEL-Sheets kein unüberwindliches Hindernis darstellen sollte, rate ich vom Gebrauch dieser ganz besonders groben Pi-mal-Daumen-Näherung ab.

Stabilität (statisch)

Das Gleichgewicht alleine reicht nicht. Das Flugzeug muß sogar Störungen, die "von außen" kommen, selbstständig korrigieren können. In diesem Zusammenhang versteht man unter "Störung" eine Veränderung des Anstellwinkels. Wenn die Flugbahn des Flugzeuges gestört wird muß sichergestellt sein, daß es aufgrund seiner Konstruktion und Gewichtsverteilung von selbst ein Nickmoment erzeugt, das der Störung entgegen wirkt. Dies wird **statische Stabilität** genannt. "Statisch" deshalb, weil noch keine Aussage gemacht wird, wie sich das Flugzeug dynamisch verhält (Schwingen, Beschleunigung, Pumpen...).

Hierzu einige sehr einfache, anschauliche Überlegungen:

Erstens: Ein Flugzeug nickt um die Querachse, die durch seinen Schwerpunkt geht.

Zweitens: Auftriebskräfte, die hinter der Nickachse (also hinter dem Schwerpunkt) erzeugt werden, lassen das Flugzeug abwärts nicken; Auftriebskräfte, die vor dem Schwerpunkt erzeugt werden, lassen das Flugzeug aufwärts nicken.

Also: Ein Flugzeug fliege *im Gleichgewicht* friedlich dahin, dann kommt eine Störung <Anstellwinkel verändert>; diese erzeugt nun *zusätzliche* Auftriebskräfte (wenn sich der Anstellwinkel verkleinert sind sie halt negativ, damit kommen *wir* doch klar, oder?); diese zusätzlichen Auftriebskräfte müssen nun so verteilt werden, daß sie

- das Flugzeug abwärts nicken lassen, wenn der Anstellwinkel durch die Störung vergrößert wurde, und
- das Flugzeug aufwärts nicken lassen, wenn der Anstellwinkel verkleinert wurde.



Beide Aufgaben werden erfüllt, wenn die durch die Störung verursachten zusätzlichen Auftriebskräfte, zusammen mit ihren Hebelarmen, mehr hinter der Nickachse (dem Schwerpunkt) als davor erzeugt werden. Je mehr Fläche (Tragfläche und HLW) *hinter* dem Schwerpunkt vorhanden ist, umso "deutlicher" wird das Flugzeug die einmal eingeschlagene Flugrichtung (den Anstellwinkel) einhalten. Ein weiter vorne liegender Schwerpunkt wird das Flugzeug also den eingestellten Anstellwinkel stabiler einhalten lassen. Das Bild links zeigt die Situation an einem stabilen und an einem instabilen Flugzeug, bei denen der Anstellwinkel durch eine äußere Einwirkung vergrößert wurde. Bitte beachten: Die senkrechten Pfeile stellen nur die *zusätzlichen* Auftriebskräfte dar, die durch den vergrößerten Anstellwinkel erzeugt werden. Beim stabilen Flugzeug werden hinter der Nickachse mehr zusätzliche Auftriebskräfte erzeugt als vorne, daher wird das Flugzeug bei dieser Störung abwärts nicken, was den Fehler ausgleicht. Beim instabilen Flugzeug ist der Schwerpunkt (und damit die Nickachse) weit hinten, daher wirken die zusätzlichen Auftriebskräfte vermehrt vor der Nickachse, also aufwärts nickend, was den Fehler vergrößert und das Flugzeug praktisch unfliegar macht. (In der Abbildung sind die Kräfte entsprechend ihren Abständen von der Nickachse gewichtet, die Pfeile stellen also eigentlich Nickmomente dar, aber die Details dazu

finden Sie in [Teil 1](#)).

Dies ist die bekannte "Windfahnen-Erklärung" zur Stabilität; ich muß allerdings warnen, die anschauliche Vorstellung dieses einfachen Bildes kann einem schon mal einen Streich spielen; verschiedene aerodynamische Effekte bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt.

Es leuchtet sicherlich ein, daß es eine Schwerpunktlage gibt, bei der das Flugzeug weder stabil noch instabil ist (dann ist es indifferent). Diese Schwerpunktlage wird *Flugzeug-Neutralpunkt* genannt. Die bisherigen Erklärungen lassen es plausibel erscheinen, daß die Lage des Flugzeug-Neutralpunktes nur von der Geometrie des Flugzeuges abhängt. Für die Lage des Schwerpunktes wird als Erfahrungswert "zwischen 5% und 15% der mittleren Flächentiefe (Profillänge) vor diesem ominösen Flugzeug-Neutralpunkt" angegeben.

Da Flugmodell-Hersteller die Lage des Neutralpunktes (fast?) nie angeben kann der Praktiker mit dieser Aussage nicht sehr viel anfangen; nur: Der Bereich, in dem man den Schwerpunkt vernünftigerweise variieren kann hat also etwa die Größe von einem Zehntel der mittleren Flächentiefe. Hersteller tun gut daran, eine von 2 Möglichkeiten zu wählen:

- entweder sie geben eine Empfehlung des sinnvollen Bereiches für das spezielle Modell an (und der sollte dann deutlich kleiner als 10% der Flächentiefe sein), oder
- sie empfehlen eine Anfangs-Schwerpunkt-Lage im "sicheren" Bereich, also je nach Modell und Zielgruppe zwischen 10% bis 15% der mittleren Flächentiefe vor dem Neutralpunkt. Der geübte Modellpilot wird dann beim Einfliegen vorsichtig (!) den Schwerpunkt weiter zurückverlegen.

Wenn der ganze sinnvolle Schwerpunkt-Bereich etwa ein Zehntel der mittleren Flächentiefe groß ist sollte dies dazu anhalten, den Schwerpunkt um nicht mehr als 2% (vielleicht mal 3%) der mittleren Flächentiefe zu verlegen ohne einen neuen Probeflug zu machen, damit es keine bösen Überraschungen gibt.

Beide Bedingungen, Gleichgewicht und statische Stabilität, sind in den folgenden Seiten ausführlich behandelt:

Teil 1: Grundlagen und des Pudels Kern

Hier gebe ich ein paar Erläuterungen zu physikalischen Begriffen, die sich in Diskussionen schon einmal als falsch verstanden herausstellten. Ebenso erläutere ich grundlegende Eigenschaften des Tragflügel-Profiles, die uns die Aerodynamik liefert. Ferner gebe ich die Grund-Idee der Berechnung des Gleichgewichtes und der Stabilität an.

Teil 2: Verfeinerungen, Korrekturen

Die allgemeinen Überlegungen bedürfen einiger Verfeinerungen um zu brauchbaren Ergebnissen zu führen.

Teil 3: Rechenanleitung und **Beispiele**

Hier wird Schritt für Schritt beschrieben, wie man ein Modell "nachrechnet". Dieser Abschnitt baut natürlich auf den vorhergehenden Ausführungen auf.

Teil 4: Wie zuverlässig sind die Ergebnisse?

Eine Untersuchung der Fehlerquellen der beschriebenen Rechenmethode.

Beachten Sie auch noch die **Anhänge**:

Formelzeichen, Erklärungen zu ein paar häufig benützten Ausdrücken (Vokabeln) und ein Quellenverzeichnis.

Weitere Verhaltensweisen eines Flugmodelles werden von Modellbau-Amateuren gewöhnlich nicht mehr rechnerisch behandelt, denn die Rechnungen sind kompliziert und erfordern weitere Daten vom Modell, die nicht gemessen werden (z.B. das Trägheitsmoment um die Nickachse):

Pendeln

Wenn ein Flugzeug in den eingestellten Flugzustand zurückgeführt wird nimmt es diesen Zustand nicht einfach wieder ein sondern "pendelt sich ein"; diese Schwingung wird im Modellbereich gewöhnlich nicht untersucht. Man sollte bestrebt sein, ein rasches Abklingen der Schwingung zu erreichen; das probateste Mittel hierfür ist, die Masse des Flugzeuges möglichst eng um den Schwerpunkt zu konzentrieren.

Pumpen



Des weiteren bedeutet eine Störung ja nicht nur eine Änderung des Anstellwinkels sondern auch der Fluggeschwindigkeit etc. Die Geschwindigkeitsänderungen erfolgen mit zeitlicher Verzögerung; die tatsächlichen Störungen der Flugbahn sind daher nur mit relativ komplizierten Differenzialgleichungen zu beschreiben; nur ein theoretischer Sonderfall (verlustfreie, d.h. ungebremste Flugbahn) konnte mit einer Formel gelöst werden: die bekannten Phygoiden. Für den Flugmodellbau-Amateur wird hier nur die praktische Empfehlung ausgesprochen, das Modell nicht zu stark statisch stabil einzustellen, ich komme darauf zurück.

Eine ganze Reihe von speziellen Fragen werden in diesem Aufsatz nicht behandelt:

- Nurflügel: Die hier vorgestellte Stabilisierungsmethode bedarf eines Höhenleitwerkes; ein Flugzeug, das kein Höhenleitwerk besitzt, dem also was fehlt 😊, kann mit den hier beschriebenen Methoden nicht zu einem stabilen Flug gebracht werden, da muß man sich was anderes einfallen lassen. Sehen Sie z.B. auf den Internet-Seiten "[aerodesign](#)" von Hartmut Siegmann oder auch bei [Dr. Martin Hepperle](#) um, da werden Sie fündig.
- Canards (Enten): Die hier beschriebenen Stabilisierungsmethoden funktionieren auch bei Canards, man muß nur einige Vorzeichenregeln beachten. Der Abwind-Effekt, dessen Berechnung schon bei Normal-Flugzeugen schwierig ist, erweist sich bei Canards als besonders undruchsichtig und ist mit den hier vorgestellten einfachen Rechnungen "nur sehr ungefähr" abzuschätzen; allerdings wirken sich diese Effekte nur auf einen Teil des Flügels aus und die Fehler verkleinern sich dadurch wieder ein wenig.
Mit den beschriebenen Rechenmethoden kann man eine Ente mehr oder weniger genau nachrechnen; was allerdings unternommen werden muß, um eine "schlechte" Ente "gut" zu machen, das werden Sie hier leider nicht finden (das wüßt' ich selber gerne...)
Vor mehr als 15 Jahren haben Gerd Hildmann und Dieter Schall in MFI eine Methode zum Entwurf und zur Optimierung von Canard-Modellen vorgestellt.
- Propeller: Die Auswirkungen von Propeller-Antrieben werden hier nicht behandelt.

- Hoch liegende Antriebe, z.B. Klapptriebwerke bei Seglern: Ist (noch) nicht behandelt, könnte später folgen.
- Doppeldecker: Das muß ich noch lernen und dann nachholen.

Und hier:

Erläuterungen zur Praxis

Wer nur Hinweise zum praktischen Fliegen benötigt, kann die ausführlichen Erklärungen (zunächst) überschlagen und hier weiterlesen. Es werden die allerwichtigsten Ergebnisse der Theorie zusammengefaßt und dann angewandt:

Was bedeutet statische Stabilität für ein Flugmodell?

Die statische Stabilität wurde wie folgt definiert:

1. Es gibt einen "eingestellten" Flugzustand; er wird durch den Anstellwinkel (und damit dem c_A) bestimmt, mit dem der Flügel betrieben wird. Dazu passend ist das Höhenleitwerk eingestellt (EWD incl. Trimmung), so daß das Flugzeug in diesem Flugzustand im Gleichgewicht ist.
2. Wenn durch eine externe Störung das Flugzeug mit einem anderen als dem eingestellten Anstellwinkel fliegt entwickelt es selbst ein rückführendes Nickmoment, das den Anstellwinkel wieder herstellt.

Sonst nichts. *Es wird nur ein korrigierendes Nickmoment erzeugt, das bestrebt ist, den Anstellwinkel wieder einzustellen.*

Diese simple Stabilisierung reicht aus, das Flugzeug bei nicht zu großen Störungen, also bei angenehmen Flugbedingungen, von alleine einen gestreckten Gleitflug fliegen zu lassen. Bei starken Störungen jedoch führt die statische Stabilisierung zu unangenehmen Reaktionen des Modelles und damit nicht immer zum gewünschten Ergebnis.

- Starke Änderung des Anstellwinkels ohne Änderung der Fluggeschwindigkeit (die viel zitierte Thermik): Durch Einflug in ein Gebiet mit aufwärts gerichteter Strömung vergrößert sich der Anstellwinkel.
 Stark vereinfachtes Beispiel: Ein Flugmodell fliege mit 10m/s aus ruhiger Luft in ein Gebiet mit 1m/s Aufwärts-Strömung ein (wir tun gelegentlich ganz schön lange rum um das zu erreichen): Dann vergrößert sich der Anstellwinkel um $\arctan(1/10) \approx 6^\circ$! So kraß und plötzlich kommt es in der Realität natürlich nicht vor, dennoch: Wenn das Modell nicht sofort reagiert reißt die Strömung ab. Das Modell muß abwärts nicken (und wenn der Schwerpunkt stimmt, dann tut's das auch).
 Das ist ja ganz in Ordnung, aber jetzt stellen Sie sich eine Bö von *oben* vor: Die Kiste wird aufwärts nicken. Also: Der beliebte "Duscherer" von oben und das Flugzeug versucht zu steigen, wird dadurch langsam und schmiert endgültig ab (Es hat schon tragische Unfälle gegeben, die auf diesen Effekt zurückzuführen waren).
 Was kann man tun dagegen? Wenig. Man kann die Neigung des Modelles zum Nicken begrenzen, also es statisch nicht allzu stabil einstellen. Dann muß man aber solche Störungen "intelligent" aussteuern, besser als es das Modell von alleine machen

würde.

- Falsche Fluggeschwindigkeit (gegenüber der Luft): Diese Störung kann z.B. durch eine von vorne kommende Bö hervorgerufen werden, sie hat unangenehme Störungen der Flugbahn zur Folge. Nehmen wir einmal der Einfachheit halber an, die Bö komme *genau* im Flugpfad entgegen (der "saubere", seltene Fall). Dann ändert das Flugmodell durch die Bö seinen Anstellwinkel nicht und bleibt erstmal im Gleichgewicht. Allerdings steigt der Betrag des Auftriebes stark an; ein Beispiel: Das Modell fliege mit 10m/s friedlich im Endanflug vor sich hin und wird plötzlich von einer Bö mit 2m/s exakt von vorne erfaßt. Damit steigt die Fluggeschwindigkeit auf das 1.2-fache und der Staudruck auf das $(1.2^2=1.44)$ -fache, entsprechend auch die vom Flügel gelieferte Auftriebskraft. Das Flugzeug wird also senkrecht zur Flugbahn nach oben beschleunigt, und zwar mit einer Kraft, die in diesem Beispiel knapp seinem halben Eigengewicht entspricht, also nennenswert. Dabei dreht es sich erstmal *nicht* um seine Nickachse, denn die Stabilitätsbedingung ist ja *noch* nicht verletzt.

Aber: Durch die Beschleunigung nach oben erhält die Anströmung des Flugzeuges eine mit der Zeit wachsende von oben kommende Komponente: Allmählich wird der Anstellwinkel kleiner. *Jetzt* kommt die statische Stabilisierung in's Spiel: Der Anstellwinkel ist kleiner geworden, also muß das Flugzeug aufwärts nicken. Schade, in dieser Situation ist das leider eine Reaktion, die uns garnicht gefällt...

Wichtig daran ist, daß die Reaktion des Flugzeuges mit einer gewissen Verspätung eintritt, nämlich erst wenn der erhöhte Auftrieb das Flugzeug (entgegen seiner Trägheit) nach oben beschleunigt hat. Die vertikale Bewegung ist für den ungeübten Piloten nicht ohne weiteres sichtbar, er merkt erst das unerwünschte Aufwärts-Nicken.

Wie lange geht das so? Aufwärts-Nicken heißt ja, daß das Flugmodell allmählich Fahrt abbaut; erst wenn die Fluggeschwindigkeit wieder zur gerade getrimmten EWD "paßt", wird das Flugzeug nicht mehr nach oben beschleunigt und fliegt einen Augenblick so weiter... bis es zu langsam geworden ist, und das ganze blöde Spiel mit umgekehrtem Vorzeichen nochmal abläuft: Die Kiste sackt durch, nickt abwärts und nimmt wieder Fahrt auf, bis sie zu schnell ist und so weiter. Das nennt man "**Pumpen**".

Welche Modelle sind Pump-gefährdet? Leichte Modelle (genauer: Modelle mit geringer Flächenbelastung), die durch eine Geschwindigkeits-Änderung rasch vertikal beschleunigt werden können. Und: Statisch sehr stabil eingestellte Modelle (Schwerpunkt weit vorne), bei denen schon kleine Änderungen des Anstellwinkels zum starken Nicken führen.

Was kann man dagegen tun? Nun, wer ein leichtes Modell hat will nicht unbedingt ein schweres Modell, er wird also nicht aufballastieren um G/F zu erhöhen. Klar. Aber den Schwerpunkt etwas nach hinten zu verlegen, damit die statische Stabilität geringer wird, das hilft gegen Pumpen. Garantiert.

Erhöhter Widerstand dämpft auch das Pumpen, aber ich glaube nicht daß irgendjemand jemals sein Modell absichtlich "schlechter" macht um das Pumpen loszuwerden - ich will dies nur hier erwähnen um nicht ein Rätsel entstehen zu lassen, warum "schlechte" Modelle leichter steuerbar erscheinen können...

Diese Punkte legen dar, daß ein statisch sehr stabil eingestelltes Modell in unruhiger Luft sehr "unartig" fliegt.

Ferner wird von vielen Modellfliegern als praktische Erfahrung mitgeteilt, daß die Steuerbarkeit eines Modelles bei übertriebener Stabilität leidet. Es ist schwer, den Begriff "Steuerbarkeit" exakt zu definieren; ein zu stark stabil eingestelltes Modell kann nicht einfach mal "schnell gemacht" werden, dazu ist eine neue Trimmung des Anstellwinkels (= Einstellung der EWD durch Höhenruder-Trimmung) erforderlich, dieser neue Anstellwinkel wird dann "sklavisch" eingehalten; das sehr stabile Modell ist zwar auf "schnell" (kleiner Anstellwinkel) trimmbar, aber es wird bei der sich einstellenden hohen Geschwindigkeit heftige Korrekturen ausführen um den Anstellwinkel einzuhalten - das kann im Extremfall die Struktur überladen. Ein nicht so stabiles Modell hingegen muß man nur kurz andrücken und es wird den neuen Flugpfad, obwohl nicht zur eingestellten EWD passend, nicht sofort wieder verlassen und wie gewünscht Fahrt aufnehmen - das ist sicherlich angenehmer.

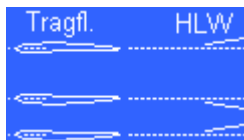
Ein wenig stabil eingestelltes Flugmodell erfordert allerdings, daß der Pilot es aufmerksam steuert; er muß auf große Distanz Fehler in der Fluglage erkennen und sofort korrigieren können. Ein wenig stabiles Flugmodell nimmt nach einem Steuerfehler nicht mehr so schnell die eingestellte Fluglage wieder ein.

Letztendlich ist das also Sache des Piloten, seines Könnens und seiner bevorzugten Wetterlage, ob er sein Modell stabil (Anfänger) oder weniger stabil eingestellt fliegt.

Kurvenflug

Das ist zwar nicht Thema dieses Aufsatzes, aber folgendes Detail sollte man nicht außer Acht lassen: Im Kurvenflug muß der Tragflügel nicht nur das Gewicht des Flugzeuges tragen sondern auch noch die Kraft für die horizontale, seitliche Beschleunigung aufbringen. Das hat z.B. zur Folge, daß in einer Kurve mit 45° Schräglage (ohne Schieben) der Tragflügel um etwa 40% erhöhten Auftrieb liefern muß; dies führt, wenn die Geschwindigkeit nicht erhöht wird, dazu, daß der Tragflügel sofort mit einem entsprechend größeren Anstellwinkel fliegen muß - ein stabil eingestelltes Flugmodell reagiert darauf mit Nicken nach unten/außen (=Absacken), das mit erhöhtem Ziehen kompensiert werden muß.

Rückenflug



Das Bild links zeigt eine Konfiguration mit einer reichlich übertriebenen EWD im Normalflug (oben) und im Rückenflug (Mitte). Folgendes ist sofort zu sehen: Im Rückenflug entsprechend der mittleren Konfiguration ist die EWD völlig falsch. Die Nickmomentebilanz gilt natürlich auch im Rückenflug und wenn man mal von den Effekten absieht, die sich einstellen, wenn das Tragflügelprofil verkehrt herum betrieben wird (geringerer Auftrieb, mehr Widerstand, anderes Profil-Nickmoment etc.) muß die EWD im Rückenflug so aussehen wie unten dargestellt. Dies erreicht man durch kräftig "Drücken". Ferner ist leicht zu sehen, daß bei kleiner EWD das erforderliche Drücken geringer ausfallen wird; "kleine EWD" bedeutet auch "Schwerpunkt weiter hinten" und das wiederum "weniger stabil eingestellt". Akro-Flugmodelle werden aus mehreren Gründen sehr wenig stabil eingestellt, der Rückenflug ist also problemlos möglich; "normale" Flugzeuge sind jedoch stabil (im manntragenden Bereich

oft auch sehr stabil) ausgewogen - das macht den Normalflug einfacher, den Rückenflug aber schwieriger oder sogar unmöglich. Der Flugzeug-Neutralpunkt ändert sich nicht im Rückenflug (jedenfalls soweit es unsere einfachen Betrachtungen betrifft), der Schwerpunkt auch nicht. Ein stabiles Flugzeug wird also auch auf dem Rücken stabil fliegen. Das Problem ist nur, das "Drücken" zur EWD-Korrektur sauber hinzukriegen; für Benutzer gut ausgestatteter RC-Anlagen lohnt es sich also, einen Flug-Zustand mit entsprechender Trimmung für den Rückenflug vorzusehen, dann muß er sich nur noch um die Querruder kümmern.

Der Abfangbogen-Test zur Überprüfung der Schwerpunktlage

Wichtig: Den Abfangbogen-Test machen wir erst, wenn wir mit ein paar vorsichtigen Flügen sichergestellt haben, daß das Modell im Gleichgewicht ist und wenigstens ein wenig stabil und geradeaus fliegt. Nochmal: Die allerersten Flüge machen wir "mit 10%". Da wir Ungenauigkeiten in den Rechnungen haben wissen wir ja nicht genau, ob es wirklich "10%" sind. Und jetzt: Der Abfangbogen-Test

...ist nichts weiter, als daß absichtlich eine hohe Fluggeschwindigkeit mit der Trimmung für normalen Flug kombiniert wird: Das Modell fliegt dann mit einem kleineren Anstellwinkel als durch die EWD vorgesehen und sollte aufwärts nicken ohne ins Pumpen überzugehen. Man sticht an (etwa 40°-60° Sturzflug), läßt das Modell schnell werden und bringt dann das Höhenruder in die Stellung, die man für den Normalflug vorgesehen hat (einfach Knüppel loslassen). Und jetzt schauen wir, was die Kiste macht:



- Sie fängt "hart" ab und geht evt. sogar in's Pumpen über: Sie ist eindeutig zu stabil eingestellt. Schwerpunkt nach hinten (nicht mehr als wenige % der mittleren Flächentiefe, z.B. 3%, wenn das Abfangen nicht allzu hart war) und dann die Trimmung (=EWD) wieder so einstellen, daß die Gleichgewichtsbedingung erfüllt ist (das Modell also sich im Normalflug nicht von selbst aufbäumt), notfalls wieder ein paar vorsichtige Starts machen, dann wieder versuchen.
- ...oder sie fängt überhaupt nicht ab: Das sollte eigentlich nicht vorkommen, denn wir haben den ersten Flug mit "10%" angefangen und die Änderungen am Schwerpunkt nur vorsichtig vorgenommen, er also sollte eigentlich nicht zu weit nach hinten kommen. Also: "Gesteuert" abfangen (nicht zu hart!) und vorsichtig landen; den Schwerpunkt wieder nach vorne verlegen und die EWD erneut trimmen. Wenn die Kiste zu sehr instabil geworden ist und auch mit Ihrer Hilfe nicht abfangen will: Drücken bis zum Rückenflug, dann halbe Rolle. Viel Glück! Ist jetzt klar, warum wir lieber mit einem zu stabilen Modell anfangen als mit einem instabilen?
- ...oder sie ist ordentlich fliegar. Gratuliere!
Bei kleinen Modellen (Segler bis 2m) sollte das etwa so aussehen: 10m..20m Höhendifferenz gesteuerter Sturzflug, nach weiteren 30m Höhenverlust sollte das Modell dann horizontal fliegen und anschließend wieder leicht steigen und wieder rechtzeitig in den Horizontalflug übergehen um nicht zu pumpen. Bei großen Modellen dauert es natürlich länger.

Bei diesem Test kann man einen ziemlich ungeschickten Fehler machen (und ich weiß wovon ich spreche 😊): Für den Abfangbogen-Test muß das Modell auf "Normalflug" getrimmt werden, also z.B. *bestes Gleiten*, *geringstes Sinken* oder *sonstwie optimal*, je nach Einsatzzweck des Modelles; wenn man das Modell auf *Sturzflug* trimmt (das ist ohne weiteres auch mit einem sehr stabil eingestellten Modell möglich) täuscht man sich aufgrund des stabil beibehaltenen Sturzfluges ein "wenig stabil" eingestelltes Modell vor. Also: Nach jedem Abfangbogen-Test müssen *beide* Schritte durchgeführt werden: Schwerpunkt verstellen, anschließend das Modell auf Normalflug

trimmen (das ist eine neue Feineinstellung der EWD). Wenn Sie den 2. Schritt zwecks Arbeitersparnis abkürzen oder auslassen landen Sie möglicherweise nach mehreren Versuchen bei einem unsinnig stabil eingestellten Flugmodell. Ok?

Nun ist das Modell grob eingestellt; experimentieren Sie weiterhin mit der Schwerpunktlage (um +/-1% der mittleren Flächentiefe verlegen) um die Steuereigenschaften des Modelles auf Ihre persönlichen Bedürfnisse abzustimmen. Wenn Sie den Abfangbogen-Test richtig gemacht haben sollte mehr als "+/-2%" nicht mehr nötig sein - wenn's immer noch nicht stimmt dann ist was anderes faul am Modell.

Auf folgende Grenze des Abfangbogen-Tests sollte noch hingewiesen werden: Das Flugmodell fliegt natürlich gegen Ende des (gesteuerten) Sturzfluges ziemlich schnell. Bei der höheren Fluggeschwindigkeit ändern sich eventuel die aerodynamischen Eigenschaften der verwendeten Tragflügel- und Höhenleitwerk-Profile, z.B. sinkt der normierte Widerstand bei höherer Reynolds-Zahl. Falls es hierbei auch zu wesentlichen Änderungen bei den flugmechanischen Eigenschaften der Profile kommt, ist der Abfangbogentest nicht mehr repräsentativ für den Normalflug.

Eigentlich halte ich mich aus Profil-Diskussionen raus, aber bei folgenden Aussagen kann man sicherlich Einigkeit erzielen 😊: Welche fundamentalen flugmechanischen Eigenschaften können sich ändern? Das Nickmoment der Tragfläche sowie der Auftrieb des Höhenleitwerkes; beide Eigenschaften werden bei geringen Fluggeschwindigkeiten aufgrund der kleineren Reynoldszahl beeinflusst; dies kann auf 2erlei Weise geschehen:

- durch das Entstehen einer nicht mehr vernachlässigbaren laminaren Ablösung. In diesem Fall muß man sich natürlich fragen, ob man sich das richtige Profil ausgesucht hat (gilt besonders für dicke Profile am Höhenleitwerk) und das Flugmodell wird immer Ärger machen.
- durch die dickere Grenzschicht (insbesondere auf der Saugseite): Dieser Fall ist "regulär", man kann ihn nicht vermeiden. Ich studiere auch Profil-Polaren (auch wenn ich nix sag'); solange keine laminare Ablösung im Spiel ist bleiben die Auswirkungen der kleinen Reynoldszahl auf die genannten Parameter gering: Das Nickmoment der Tragfläche ändert sich kaum und beim Auftrieb (Abtrieb) des Höhenleitwerkes ändert sich vor allem das Maximum (bzw. Minimum). Man muß also bei der Auslegung des Höhenleitwerkes beim Langsamflug vom geringeren Maximalauftrieb ausgehen und die Reserven entsprechend planen. Dieser "reguläre" Einfluß des Unterschiedes in der Fluggeschwindigkeit sollte aber nicht die Aussagekraft des Abfangbogen-Tests beeinflussen.

Ferner wird allgemein betont (und ich schließe mich dem an), daß der Abfangbogen-Test nur eine grobe Einstellung des Schwerpunktes erlaubt. Beim normalen Flugbetrieb wird sich noch zeigen, ob das Modell "zuviel Eigenwillen" zeigt, nicht ordentlich kreisen will etc. Oft kann bei solchen Problemen eine geringfügige Verringerung der statischen Stabilität (deutsch: Schwerpunkt *ein wenig* nach hinten) hier Verbesserung bringen.

Das war's! Sicherlich habe ich Ihnen eine ganze Menge zugemutet, aber man sollte halt nie aus dem Auge verlieren: Modellflug ist auch **erlebte Physik** und kann auch auf diese Weise Spaß machen.

Herzlichen Dank für die konstruktive Hilfe möchte ich sagen an Christian Ückert, Michael Kiefer und Walter Sickinger! Herr Jürgen Benthack hat im Sommer 2002 einige Fehler im EXCEL-Sheet gefunden und gemeldet; ich hab's lange Zeit nicht eingesehen und Herr Benthack hat sie mir dann mit großer Geduld erklärt... Jetzt sind sie draußen. Herzlichen Dank!